

# 超相対論的電子による内殻電離における密度効果の研究

著者	神谷 正己
号	656
発行年	1980
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/24255">http://hdl.handle.net/10097/24255</a>

氏名・（本籍）	<sup>か</sup> 神 <sup>や</sup> 谷 <sup>ま</sup> 正 <sup>み</sup> 己
学 位 の 種 類	理 学 博 士
学 位 記 番 号	理 博 第 656 号
学位授与年月日	昭和55年3月25日
学位授与の要件	学位規則第5条第1項該当
研 究 科 専 攻	東北大学大学院理学研究科 （博士課程）原子核理学専攻
学位論文題目	超相対論的電子による内殻電離における密度効果の研究
論文審査委員	（主査） 教 授 森 田 右 教 授 武 田 暁 助 教 授 板 橋 清 己

## 論 文 目 次

- 第1章 序 論
  - I 相対論的電子による内殻電離
  - II 研究目的
- 第2章 実 験
  - I 実験方法
  - II 実験結果
- 第3章 理 論
  - I PWBA
  - II Kolbenstvedtの理論
  - III 半実験式及び理論値の比較
  - IV 密度効果
- 第4章 議 論
  - I K殻電離断面積
  - II K殻電離断面積の増加率
  - III 異なる元素間のK殻電離断面積の増加率の差異
  - IV 密度効果の一般的記述
- 第5章 結 論

# 論文内容要旨

## 第1章 序 論

相対論的電子による内殻電離の実験はいくつか行なわれており、相対論的PWBA及びKolbenstvedtによる仮想光子の方法によって実験値が良く再現されることが知られている。相対論的電子による内殻電離断面積は、入射エネルギーの対数に比例して増加するが、これは静的なクーロン力によってではなく、仮想光子の伝播で表わされる遅延効果によるものである。

これまでの理論では、ターゲット原子は孤立したものとして扱われているが、Kolbenstvedtの理論によれば、100 MeV以上の超相対論的電子による内殻電離における相互作用の距離は $100 \text{ \AA}$ 以上になる。このことにより、もはやターゲット原子を孤立したものとして扱うことはできず、入射電子とターゲット原子の間の物質の及ぼす影響を考慮しなければならない。この影響は、相対論的荷電粒子による電離エネルギー損失が密度の高い物質中において、入射エネルギーが非常に高くなると飽和する現象として現われる。これは密度効果と呼ばれ、入射粒子によって物質が分極を起こすために生じることが知られている。

Dangerfieldは、この効果が内殻電離においても、入射電子のエネルギーが100 MeV近くになると起こることを理論的に示した。しかし、密度効果が明らかに現われると考えられるMiddlemanらによる150～900 MeV電子によるCu, Sr等のK殻電離の実験では、最も飽和が現われやすいと考えられるCuにも飽和が認められなかった。このため、数100 MeV電子による内殻電離には密度効果は存在しないのではないかと考えられてきている。

しかしながら、密度効果を検出可能な実験はMiddlemanらによって行なわれたものが唯一で、しかも密度効果の検出を目指したものではない。密度効果が確立している電離エネルギー損失は、主に外殻電子の電離によって起こる。外殻電離と内殻電離の最も大きな相異は、電離エネルギーの大きさである。従って、Cu, Sr等より軽いNa, Mg等の元素のK殻電離に密度効果が現われることは十分期待される。

本研究の目的は理論的に予想されているにもかかわらず、今まで検出されていない、K殻電離における密度効果を実験的に検出することである。そして、150～900 MeV電子によるCu, Sr等のK殻電離に密度効果が現われなかった理由を探ることである。

## 第2章 実 験

実験は、東北大学300 MeV電子ライナックを用いて行なわれた。K殻電離断面積は入射エネルギーの対数に比例して増加する為増加率が小さい。このため得られる最小、最大の入射エネルギー70 MeV, 230 MeVで軽元素のK殻電離を行なった。誤差の小さい測定を行なうために、K殻電

離断面積の絶対値測定他に、断面積の増加率及び異なる元素の断面積の増加率の比の測定を行なった。K殻電離断面積の測定は、Na, Mg, Al 及びCl に対して、K X線を測定することによって行なわれた。増加率の測定は、これらの元素の他にMn に対して行なわれた。K X線の計数比の測定は、2つの元素からなるターゲットを用いて行なわれた。それらは、(F, Al), (Na, Cl), (Mg, Mn), (Al, Mn), (Si, Mn), (Cl, Mn), (Ca, Mn), (Zn, Sn) である。このうち(Zn, Sn) についてはL X線について測定が行なわれた。2つのエネルギーでのX線の計数比の比は(1)式に示されるように電離断面積の増加率の比を表わす。

$$\frac{Y_A(230\text{MeV})/Y_B(230\text{MeV})}{Y_A(70\text{MeV})/Y_B(70\text{MeV})} = \frac{\sigma_A^i(230\text{MeV})/\sigma_A^i(70\text{MeV})}{\sigma_B^i(230\text{MeV})/\sigma_B^i(70\text{MeV})} \quad (1)$$

ここで $Y$ ,  $\sigma^i$  は各々X線の計数、電離断面積を表わし、 $A$ ,  $B$ は元素を区別する添字である。

ターゲットは、Na, Cl, (Na, Cl) に対しては塩化ナトリウム、(F, Al) に対してはフッ化アルミニウムを用いた。他はすべて単体金属を用いた。ターゲットは、すべて真空蒸着法によってつくられ、厚さの測定は3 MeV 陽子と $^3\text{He}$ の弾性散乱によって行なわれ100~300  $\mu\text{g}/\text{cm}^2$ であった。

特性X線の測定は、低エネルギーX線には、プロポーションナル・カウンターを、比較的エネルギーの高いX線には、Si(Li) 検出器を用いて行なわれた。

実験誤差は断面積の絶対値に対して15%, 増加率に対して3~4%, 異なる元素の増加率の比に対して2~4%と見積られた。

### 第3章 理 論

K殻電離断面積は、PWBA及びKolbenstvedtの方法によって計算される。PWBAでは、入射電子とK殻電子をDiracの波動関数で記述し、Møller相互作用を用いた計算がScofieldによって行なわれており、実験とよい一致を示している。軽元素に対しては、K殻電子に対しDarwinの波動関数を用いることが良い近似となる。実験との比較はDarwinの波動関数を用いた計算によって行なわれた。

Kolbenstvedtの理論では、図1に示されるように、入射電子によってターゲット原子の位置につくられる急激に変化する電磁場を、これと等価な仮想光子スペクトルで表わし、この光子による光電効果として電離を記述する。移行運動量が大きく仮想光子を現実の光子と対応させられない衝突では、K殻電子を自由電子と見做して、自由電子間の衝突で移行エネルギーが電離エネルギーを越える時に電離が起こると考える。前者はdistant collision, 後者はclose collisionと呼ばれ電離断面積は両者の和で表わされる。PWBAとの一致は、数%以内で実験ともよく一致する。

図1から $rv/b > w$ を満たす衝突径数 $b$ の衝突によって電離が起こることが分る。超相対論的電

子による内殻電離では、最大衝突径数は  $100 \text{ \AA}$  以上になり、ターゲット原子を孤立したものとして扱えないことが分る。密度効果は物質の分極によって生じるので、この効果は物質の誘電率  $\epsilon$  を用いることによって取り入れられる。これは、longitudinal term に対しては、 $\frac{e^2}{r}$  から  $\frac{e^2}{\epsilon r}$  に、transverse term に対しては、光速度  $c$  を  $\frac{c}{\sqrt{\epsilon}}$  に変更することによってなされる。X線領域では  $\epsilon$  は非常に1に近いのでこの効果は遅延効果による transverse term だけに効く。

誘電率  $\epsilon$  は、物質中の電子をすべて自由電子と見做す近似で、 $\epsilon(w) = 1 - w_p^2/w^2$ 、 $w_p^2 = 4\pi n e^2/m \dots\dots(2)$  と表わされる。 $n$  は全電子数密度である。 $w_p$  は、プラズマ周波数と呼ばれる。(2)式がX線に対して成立することは屈折の実験等により確かめられている。しかし、この  $\epsilon$  を用いて密度効果を取り入れた計算は、Cu, Sr 等のK殻電離に飽和が現われることを示したが、Middleman らの実験には、飽和は現われなかった。

このことは、仮想光子に現実の光子に対する誘電率が用いられないことを意味している。我々の考えている仮想光子は幅  $\Delta t$  のパルス等を等価な仮想光子スペクトルに直して得られたものである。周波数  $w$  の光子は、図1に示されているように  $w < rv/b = 1/\Delta t$  を満たすパルスから生じる。分極に効く領域は、パルスの空間的広がり、 $c \cdot \Delta t \approx \lambda$  (波長) の程度になる。一方物質が固有の性質を示す最小の大きさを  $V$  とすれば、 $\lambda^3 < V$  の時には、(2)式は成立しないと考えられる。分極の領域が狭いことを考慮し、 $\lambda^3 < V$  の時には、誘電率は(3)式のように修正されると考える。

$$\epsilon(w) = 1 - w_p^2/w^2 \cdot \frac{\lambda^3}{V} \dots\dots\dots(3)$$

ここで  $V = (hd)^3$  である。 $d$  は原子間距離で、 $h$  は実験値を再現するように選ばれるパラメータである。実験との比較から  $h = 10.0$  とした。

## 第4章 議 論

$E_e = 70 \text{ MeV}$  のK殻電離断面積の実験値とPWBAの理論値を図2に示す。 $Z = 10 \sim 50$  の元素すべてに対し、非常に良い一致を示している。図3は  $E_e = 230 \text{ MeV}$  のものである。破線はKolbenstvedtの理論による。入射電子エネルギーが高くなると、軽元素では、実験値が理論値より小さくなることが分る。Naについて、密度効果を含んだ理論値との比較を図4に示す。実線と破線は各々PWBA, Kolbenstvedtの理論によるもので、太細と細線は各々密度効果を含まないもの、(3)式の誘電率を用いて密度効果を取り入れたものである。実験との一致は、密度効果を含んだ理論のほうが良く、密度効果の存在を示唆している。

Na から Mn のK殻電離断面積の増加率を図5に理論値と共に示す。白丸はMnの増加率との比から得られたものである。理論値はKolbenstvedtの方法によって得られたものであるが、PWBAによっても同じ値が得られる。破線は密度効果を含まないもので、約15%の増加を示している。点線と実線は各々(2), (3)式の誘電率を用いて密度効果を取り入れたものである。 $Z \leq 14$  の元素

では明らかに密度効果により増加率が小さくなっていることが分るが、 $Z \geq 20$  では、このことは認められない。実線は、この傾向をよく説明している。

図6に異なる元素の増加率の比を示す。軽い元素の増加率が重い元素のそれより小さいことがはっきり分る。L殻についても同様のことが、 $(Z_n, S_n)$ の実験値から分る。理論値は図5に示されているものと同じものである。仮想光子であることを考えて修正された誘電率を用いた理論が実験値をよく再現している。又この理論によれば、 $E_e = 150 \sim 900$  MeVでCu, Sr等のK殻電離に密度効果が現われなかったことが、無理なく説明される。

次に、この理論によって密度効果の現われる入射電子のエネルギーを推定する。図7に $w = w_k$  ( $\hbar w_k$  は電離エネルギー)での誘電率の1からのずれの大きさをパラメータとして密度効果の現われるエネルギーを示す。上下の2本の実線は各々、断面積が飽和値の95%, 90%となるエネルギーを表わし、増加率が著しく小さくなるエネルギー、密度効果の始まるエネルギーの目安となる。図8は実験値と比較したもので、増加率が単調に変化していることが分る。白丸はMnの増加率との比から得られたものである。このことより(3)式で表わされる誘電率の1からのずれの大きさが密度効果を表わすよいパラメータとなることが分る。

## 第5章 結 論

$E_e = 70$  MeV, 280 MeVでNaからMnまでのK殻電離を行ない、密度効果を初めて検出した。飽和が認められたのは $Z \leq 14$  元素で、 $Z \geq 20$  元素に対しては、Middlemanらの実験と同様に飽和は認められなかった。数100 MeV 電子によるK殻電離において軽い元素には密度効果が現われるが、重い元素には飽和が認められないという実験結果は、仮想光子であることを考え誘電率を修正することにより矛盾なく説明された。

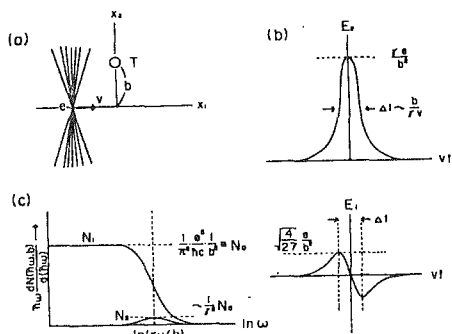


图 1

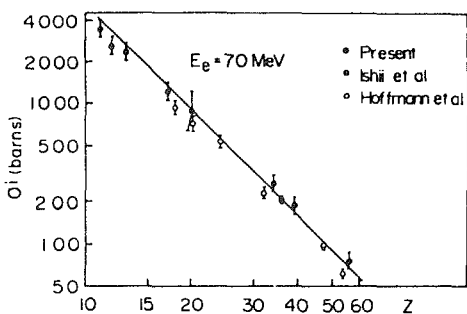


图 2

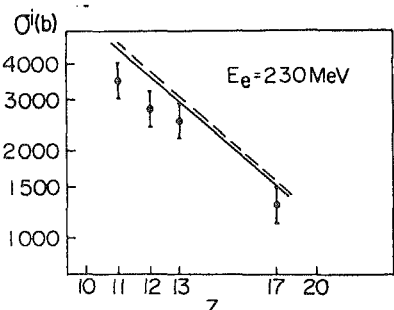


图 3

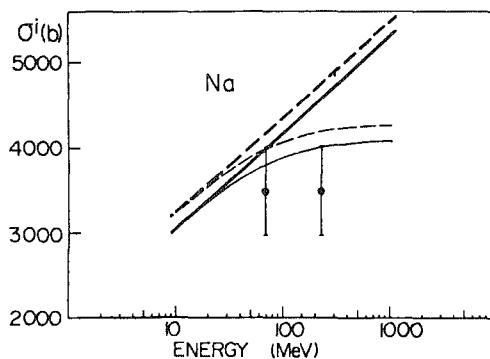


图 4

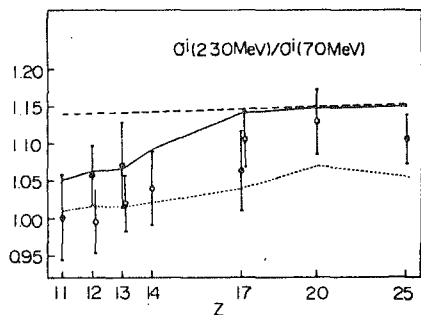


图 5

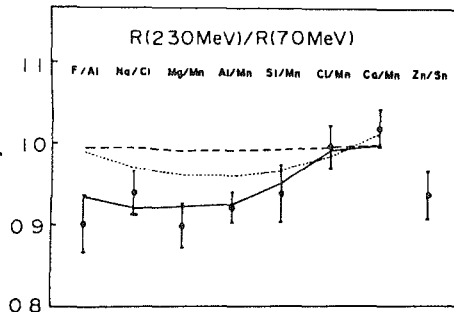


图 6

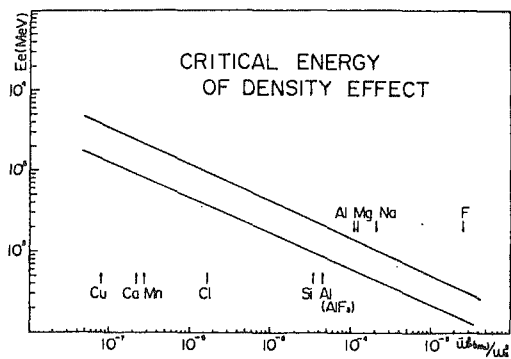


图 7

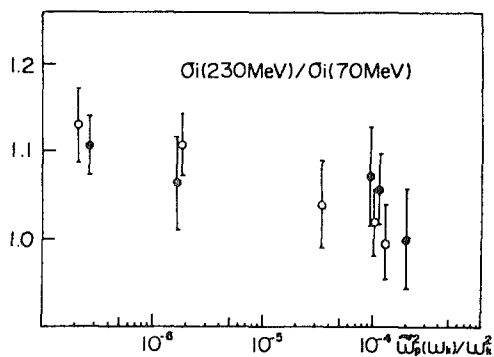


图 8

## 論文審査の結果の要旨

電子による原子の内殻電離断面積は、電子エネルギーが 100 MeV の領域になると、遅延効果のために入射エネルギーの対数に比例して増加する。この現象は、理論的には *PWBA* および仮想光子の方法によって計算され、Middleman 等や Ishii 等の実験結果とよく一致する。

ところが一方、超相対論的荷電粒子による電離エネルギー損失では、入射粒子によって物質が分極をおこすために、いわゆる密度効果が表われ、エネルギー損失は入射エネルギーの増加と共に飽和を示す。この密度効果は内殻電離においても当然表われるはずであることが、Dangerfield によって指摘された。

神谷はこの矛盾を解決するために、1. 従来の実験は中重以上の重い元素について内殻電離断面積が測定されているのに対し、密度効果は軽い元素程、顕著に表われると予想されること、2. 今までの実験は電離断面積の絶対値を測定しているため実験誤差が $\sim 40\%$ と大きく、 $15\%$ 程度と考えられる密度効果の検出は無理であることを考慮し、F から Mn までの軽元素について、電離断面積の相対値の精密測定、すなわち入射エネルギーの増加による断面積の増加率、およびこの増加率の原子番号による変化を  $4\sim 5\%$  の精度で測定した。実験は東北大学の 300 MeV 電子ライナックを用い、70 MeV と 230 MeV のビームで行われた。

その結果、密度効果を全く考慮しない理論に比べると、実験値は軽い元素になる程小さくなり、 $10\%$ 程度ずれることが確認された。このように従来理論的には当然予想されるにもかかわらず、実験で全く観測されなかった密度効果が、内殻電離で確証されると同時に、その効果の大きさが、通常の誘電率を用いて計算される値 ( $\sim 15\%$ ) よりも小さいことが判明した。それで著者は、この内殻電離が通常の光子によっておこるのではなく、入射電子による仮想光子によるものであるため、仮想光子の空間的拡がり considering して通常の誘電率をパラメーター化できるものと仮定すると、実験で測定された密度効果の大きさばかりでなく、従来の重い元素ではこの効果が全く観測されなかったことも矛盾なく説明できることを示した。

本論文は著者が自立して研究活動を行うに必要な高度な研究能力と学識を有することを示しており、よって神谷正己提出の論文は理学博士の学位論文として合格と認める。